

## ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАТИВНОГО РЕСУРСА ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ МОСТОВ

Розглянуто конструктивні особливості зварних пролітних будов залізничних мостів. Проаналізовано основні причини передчасного зародження і розвитку тріщин втоми у вузлах і елементах пролітних будов. Обговорені конструктивні і технологічні шляхи забезпечення нормативного ресурсу експлуатованих і новостворюваних суцільнозварних пролітних будов мостів.

*Ключові слова:* пролітна будова, тріщини втоми, ресурс, зварна пролітна будова, залізничний міст

Рассмотрены конструктивные особенности сварных пролетных строений железнодорожных мостов, включая периоды начала применения сварки в мостостроении. Проанализированы основные причины преждевременного зарождения и развития трещин усталости в узлах и элементах пролетных строений. Обсуждены конструктивные и технологические пути обеспечения нормативного ресурса эксплуатируемых и вновь создаваемых цельносварных пролетных строений мостов.

*Ключевые слова:* пролетное строение, трещины усталости, ресурс, сварное пролетное строение, железнодорожный мост

The structural features of welded railway bridges of the last century were considered. The basic causes of appearance of fatigue cracks in welded joints of railway bridges were assessed. Structural and technological ways of provision of the design life of operated and new-built welded railway bridges are discussed.

*Keywords:* span, cracks of fatigue, design life, built welded, railway bridge

### Введение

Пролетные строения мостов работают в сложных условиях переменного нагружения, обусловливаемого, главным образом, подвижным составом. В соответствии с нормативной документацией [1] они должны рассчитываться на 100 лет эксплуатации. В то же время опыт показывает, что трещины усталости зарождаются значительно раньше. Так, например, в типовых сварных пролетных строениях железнодорожных мостов они появляются после 1...7 лет эксплуатации в элементах и сварных соединениях, в которых их не ожидали и на усталость не рассчитывали [2, 3].

Цель настоящей работы состоит в установлении основных причин преждевременного зарождения трещин усталости в элементах пролетных строений железнодорожных мостов и определении путей их предупреждения на протяжении всего нормативного срока эксплуатации.

### Факторы, приводящие к преждевременному зарождению трещин усталости в элементах сварных пролетных строений железнодорожных мостов

Эксплуатируемые сегодня на сети железных дорог Украины пролетные строения условно

можно разделить на 2 группы. Первая из них относится к начальному периоду (50-е годы прошлого столетия) применения сварки в мостостроении (рис. 1).

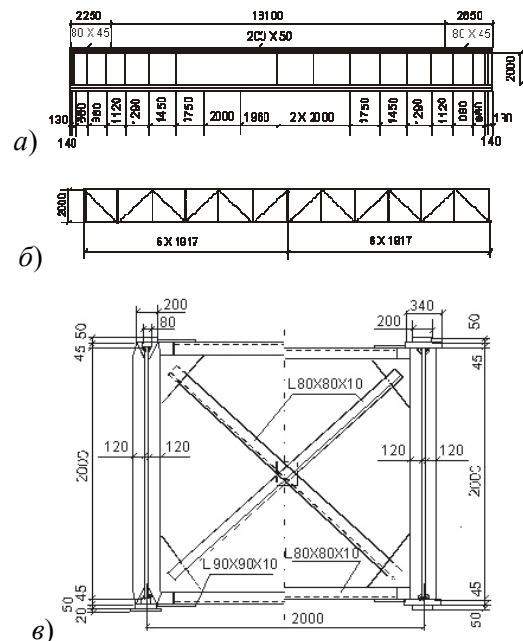


Рис. 1. Пролетное строение железнодорожного моста с расчетной длиной 23,0 м (проектирование 50-х годов прошлого столетия): а) – фасад; б) – схема верхних (слева) и нижних (справа) продольных связей; в) – поперечные разрезы на опоре (слева) и в пролете (справа)

Институт электросварки НАН Украины принимал под руководством академика НАНУ Е. О. Патона активное участие в проектировании сварных пролетных строений. Конструктивно они, по сути, воспроизводили клепанные [4]. Опыт эксплуатации показал, что в таких пролетных строениях через 20...30 лет зарождаются трещины усталости. Ими повреждались, главным образом, фланговые швы прикрепления продольных связей и верхних распорок (рис. 2, а). Зарождались трещины усталости и в зонах высокой концентрации напряжений, обусловливаемой неплавно примыканием распорки к верхней фасонке и последней к внутреннему вертикальному ребру жесткости (рис. 2, б). Развивались такие трещины по основному материалу (рис. 2, б).

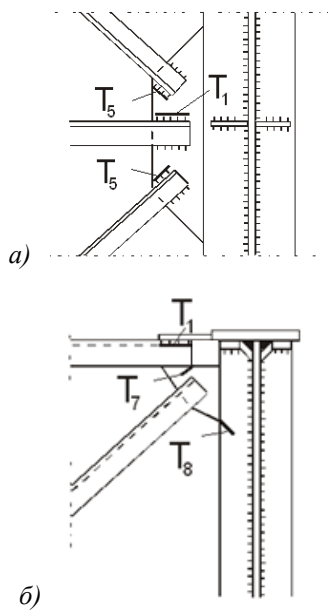


Рис. 2. Места зарождения и развития трещин усталости в пролетном строении железнодорожного моста (проектирование 50-х годов прошлого столетия):

а) – фланговые швы прикрепления продольных связей ( $T_5$ ) и верхних распорок ( $T_1$ ); б) – основной металл верхней фасонки ( $T_7$ ) и внутреннего вертикального ребра жесткости ( $T_8$ )

Анализируя причины зарождения трещин усталости в сварных пролетных строениях 50-х годов, отметим главные из них: внецентренное приложение поездной нагрузки и, как следствие, вибрация элементов; высокая концентрация напряжений в зонах примыкания связей и фасонки.

В 1946 году по инициативе академика НАН Украины Е. О. Патона был создан НИИМостов при ЛИИЖТе. Основной его задачей было совершенствование конструкции пролетных строений железнодорожных мостов с широким применением сварки. В результате в 60-х-70-х

годах была создана вторая группа проектов (больше десяти) пролетных строений железнодорожных мостов. Один из них проектирования Ленгипротрансмоста показан на рис. 3.

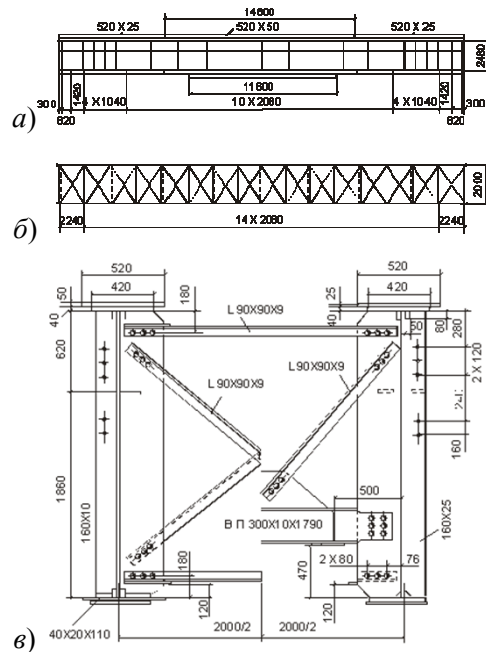


Рис.3. Типовое пролетное строение железнодорожного моста проектирования Ленгипротрансмоста (Ленинград), расчетная длина 33,6 м:

а) – фасад; б) – схема продольных связей; в) – поперечные разрезы в пролете (слева) и на опоре (справа)

Принципиальными изменениями в них по сравнению с проектами 50-х годов являются: смещение связей с уровня поясов и прикрепление их к вертикальным ребрам жесткости; увеличение ширины поясов до 420...620 мм в зависимости от длины пролета; сопряжение вертикальных ребер жесткости с нижними растянутыми поясами с помощью «сухариков». Главная цель этих изменений состояла в освобождении растянутых поясов от сварки. Однако, такие «усовершенствования» привели не только к изменению мест зарождения трещин усталости (рис. 4), но и к существенному снижению долговечности и надежности мостов. Если повреждения элементов связей мало влияют на работоспособность пролетного строения, то этого нельзя сказать об усталостных трещинах, которые развиваются в стенках главных балок ( $T_9$ ,  $T_{10}$ ) и в поясных швах ( $T_{13}$ ). Они очень опасны.

До образования трещин достаточных размеров, чтобы их можно было обнаружить, проходило от четырех до семи лет, а в некоторых случаях (на ветках значительной грузонапряженности) они наблюдались через 1...3 года эксплуатации сооружения. Столь раннее заро-

ждение трещин усталости было обусловлено значительным усилением эффекта внецентренного приложения нагрузки на пролетное строение от подвижного состава за счет увеличения ширины верхних поясов и их освобождения от связей. Ярким свидетельством сказанного служит появление трещин в поясных швах ( $T_{13}$ , рис. 4).

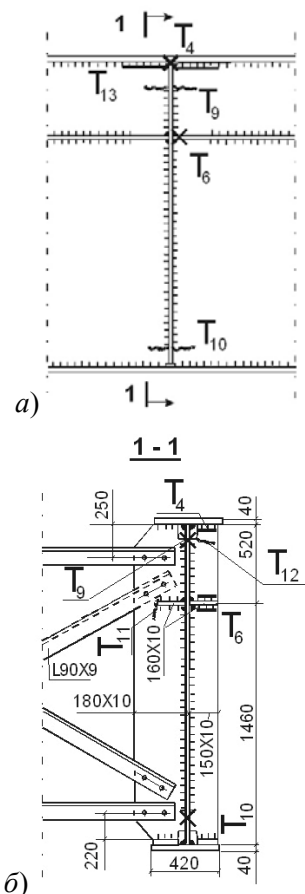


Рис. 4. Места зарождения и развития трещин усталости в элементах типовых пролетных строений железнодорожных мостов проектирования 70-х годов (проекты № 541 и № 821). Наиболее опасные трещины, развивающиеся в стенке главных балок ( $T_9$ ,  $T_{10}$ ) и в поясном шве ( $T_{13}$ )

Для исправления создавшегося сложного положения с типовыми пролетными строениями НИИМостов разработал соответствующие «Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений» [5]. При этом использование сварки полностью исключалось. В качестве главного средства для ремонта рассматривались накладки и высокопрочные болты.

Вытеснение сварки продолжалось и в дальнейшем, хотя приведенные данные явно указывают на прямую связь главных причин возникновения трещин усталости с конструктивными недостатками типовых пролетных строений

мостов, а не со сваркой. Тем не менее, продолжалась замена сварных соединений на болтовые. Уже в 60-х годах появились первые болты в пролетных строениях. С их помощью стали прикреплять продольные и поперечные связи к фасонкам, а затем стали крепить высокопрочными болтами и сами фасонки связей к главным балкам, а также вертикальные ребра жесткости к стенке балок, используя дополнительно уголки. Сварными остались только стыки листов главных балок и поясные швы. Обнадеживающим здесь является только то, что авторы работы [6] считают такой типовой проект (1991 г.) временным, «пока не будут найдены рациональные и надежные решения цельно-сварной конструкции».

По сравнению с цельносварными, заводское изготовление болтосварных пролетных строений существенно усложнилось, и возросла их металлоемкость. Принципиальное значение тут имеет опыт эксплуатации таких пролетных строений, который показал, что замена сварных соединений болтовыми не гарантирует исключения усталостных разрушений, поскольку остаются главные источники их возникновения – внецентренное приложение поездной нагрузки на несущие балки и другие рассмотренные выше причины, которые порождают вибрацию элементов пролетного строения и дополнительные местные переменные напряжения.

Вполне очевидно, что определяющим в передаче подвижной нагрузки на пролетное строение и деформирование его элементов является устройство мостового полотна. Наиболее неблагоприятным с точки зрения зарождения трещин усталости следует признать широко используемое до настоящего времени мостовое полотно на деревянных поперечинах. Поскольку деревянные поперечины, к которым крепится рельсовый путь, укладываются непосредственно на верхние пояса главных балок пролетного строения, то из-за внецентренного приложения поездной нагрузки проезд каждой тележки (даже оси) подвижного состава вызывает кручение пояса и выгиб стенки на участке выреза вертикальных ребер жесткости. Изгиб стенки между ребрами жесткости вызывает поворот нижнего пояса, что и приводит к возникновению колебаний стенки отсека. При определенных скоростях подвижного состава такие колебания могут быть резонансными.

Замена мостового полотна на деревянных поперечинах безбалластным мостовым полотном на железобетонных плитах (БМП) улучшает работу пролетного строения. Поездная на-

грузка передается не локально на пояса главных балок, а на пролетное строение в целом, что способствует снижению вибрации элементов и уровня дополнительных напряжений. Эффективность применения БМП возрастает, когда железобетонная плита объединяется для совместной работы с главными балками путем их соединения высокопрочными болтами или гибкими приварными анкерами (шпильками) [7].

Уменьшение динамических воздействий подвижного состава на элементы пролетного строения обеспечивается использованием балластного мостового полотна. Достигается это за счет поглощающих свойств балластного слоя. В качестве поддерживающей конструкции балластного слоя применяется железобетонное или металлическое балластное корыто.

Балластное мостовое полотно с металлическим корытом, днище которого представляет собой ортотропную плиту, позволяет органично усовершенствовать конструктивно и само пролетное строение. Ортотропная плита балластного корыта объединяется при помощи сварки с верхними поясами главных балок, образуя расширенный верхний пояс. Объединив подобной ребристой плитой, нижние части главных балок (расширенный нижний пояс) образуется коробчатое пролетное строение. Такие коробчатые пролетные строения с проезжей частью в виде ортотропной плиты сегодня широко используются при проектировании и изготовлении автодорожных мостов.

Ортотропная плита проезжей части пролетного строения представляет собой сложную пространственную конструкцию. Она состоит из плоского листа настила с приваренными для повышения его жесткости в двух взаимно ортогональных направлениях продольными ребрами и поперечными балками (рис. 5). При этом продольные ребра пропускают сквозь вырезы в стенках поперечных балок, которые объединяются с помощью сварки в зоне вырезов. Под воздействием подвижной нагрузки ортотропная плита проезжей части подвергается осевым усилиям и пространственному изгибу.

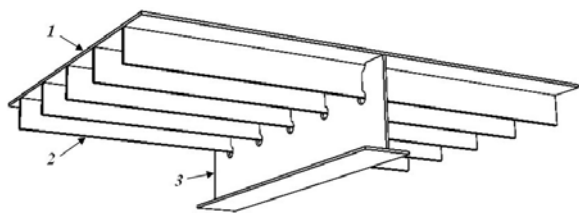


Рис. 5. Ортотропная плита проезжей части:  
1 – лист настила; 2 – продольные полосовые ребра жесткости; 3 – поперечная балка

Конструктивное решение ортотропной плиты, обусловливаемое выбором типа продольных ребер – плоские (полосовые), замкнутые (трапециевидные, прямоугольные, треугольные, U-образные, полуэллиптические и др.), формы выреза в стенке поперечной балки для пропуска продольного ребра жесткости и способа их соединения, играют важную роль в обеспечении ее работоспособности.

Каждый из типов продольных ребер имеет свои определенные достоинства и недостатки. Так, первые из них наиболее простые конструктивно и удобные для стыкования, но не оптимальные для работы на изгиб. Вторые – эффективны для работы на изгиб и хорошо сопротивляются кручению, но менее удобные для стыкования и пересечения с поперечными балками. Опыт эксплуатации сплошностенчатых пролетных строений с проезжей частью в виде ортотропной плиты показал их склонность к преждевременному образованию трещин усталости в узлах пересечения продольных ребер жесткости и поперечных балок [8].

Выбор конструктивного оптимального решения ортотропной плиты с нормативной долговечностью наиболее перспективно осуществлять на базе ее прогнозирования, основанного на расчете методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния (НДС) в «горячих точках» и соответствующих базовых кривых сопротивления усталости, получаемых в условиях нагружения, подобных эксплуатационным. Для определения НДС составляется расчетная конечно-элементная модель пролетного строения с подбором типов конечных элементов в соответствии с характером деформирования его конкретных участков. Все пролетное строение моделируется в основном двумерными конечными элементами за исключением узлов, склонных к трещинообразованию, для которых используются трехмерные конечные элементы с размерами, достаточным для расчета НДС с необходимой точностью.

Прогнозирование долговечности отдельных узлов на стадии проектирования позволит отработать конструктивные и технологические решения, обеспечивающие нормативный ресурс пролетного строения. Составление конечно-элементной модели всего пролетного строения, включая ортотропную плиту, и практическая реализация данного подхода требует отдельного более детального рассмотрения.

Наряду с конструктивными усовершенствованиями пролетных строений мостов важно уделять серьезное внимание оформлению свар-

ных узлов, выполнению сварки и проведению упрочняющей обработки соединений. Установлено [9-11], что радикальным средством, предупреждающим преждевременное зарождение трещин усталости в сварных соединениях, является их высокочастотная механическая проковка (ВМП). Обработывается специальным инструментом узкая зона перехода от металла шва к основному материалу. При ВМП в зоне обработки за счет интенсивного локального пластического деформирования снижаются растягивающие остаточные напряжения и создаются благоприятные сжимающие, уменьшается величина концентрации напряжений, деформационно упрочняется обрабатываемый участок металла с измельчением зерна и образованием поверхностной наноструктурной прослойки. Все это способствует существенному повышению циклической долговечности и предела выносливости сварных соединений.

Предлагаемый путь позволит выбирать рациональные и надежные решения цельносварной конструкции пролетного строения мостов.

### Выводы

1. Основной причиной преждевременного зарождения и развития трещин усталости в пролетных строениях железнодорожных мостов 50-х...70-х годов проектирования является внецентренное приложение поездной нагрузки, обуславливающее вибрацию элементов и дополнительные напряжения.

2. «Совершенствование» конструкции пролетных строений железнодорожных мостов и создание в 70-х годах прошлого столетия большого числа типовых проектов шло по пути замены сварных соединений на болтовые, без устранения главных конструктивных недостатков, приводящих к низкому сопротивлению усталости отдельных узлов и элементов. Такая тенденция, к сожалению, сохраняется и сегодня. Сварными остались только стыки листов главных балок и поясные швы (типовой проект 1991 г.).

3. Наиболее перспективным путем обеспечения центрированного приложения поездной нагрузки на пролетное строение железнодорожных мостов является совершенствование мостового полотна. Для эксплуатируемых пролетных строений целесообразна замена мостового полотна на деревянных поперечинах безбалластным. При этом железобетонная плита объединяется для совместной работы с главными балками.

4. Балластное мостовое полотно с металлическим корытом, поддерживающим балластный слой, днище которого представляет собой ортотропную плиту, позволяет создать жесткое коробчатое пролетное строение с более равномерным распределением напряжений от поездной нагрузки и пониженной склонностью к вибрации элементов.

5. Выбор конструктивного оптимального решения пролетного строения моста, включая ортотропную плиту, с точки зрения обеспечения нормативной долговечности целесообразно осуществлять на стадии проектирования, исходя из анализа методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния конкретных узлов и прогнозирования их долговечности, основываясь на локальных напряжениях в «горячих точках» и соответствующих базовых кривых сопротивления усталости.

6. Зону перехода от металла шва к основному материалу сварных соединений пролетных строений мостов в узлах, склонных к образованию трещин усталости, а также после выполнения ремонтных работ с помощью сварки на эксплуатируемых пролетных строениях, необходимо обрабатывать высокочастотной механической проковкой для обеспечения их нормативного срока эксплуатации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. [Текст]. – Введ. 2007-02-01. – К.: Мін. буд., архіт. та житл.-комун. госп-ва, 2006. – 359 с.
2. Лучко, Й. Й. Механіка руйнування мостових конструкцій та методи прогнозування їх залишкової довговічності [Текст] / За ред. Й. Й. Лучка. – Львів: Каменярь, 2004. – Т. 6. – 883 с.
3. Кир'ян, В. І. Механіка руйнування зварних з'єднань металоконструкцій [Текст] / В. І. Кир'ян, В. А. Осадчук, М. М. Николишин. – К.: СПОЛОМ, 2007. – 320 с.
4. Евграфов, Г. К. Мосты на железных дорогах [Текст] / Г. К. Евграфов. – М.: Гос. трансп. железнодорож. изд-во, 1941. – 608 с.
5. Указания по осмотру и усилению эксплуатируемых сварных пролетных строений [Текст]. – М.: МПС, ГУП, НИИМостов ЛИИЖТа, 1990. – 28 с.
6. Богданов, Г. И. Проектирование мостов и труб. Металлические мосты [Текст]: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под редакцией Ю. Г. Козьмина. – М.: Маршрут. 2005. – 460 с.
7. Линник, Г. О. Дослідження несної здатності прогонових будов металевих мостів з різними типами мостового полотна [Текст] / Г. О. Лин-

- ник // Дороги і мости. – К.: Держдор НДІ, 2008. – № 9. – С. 141-144.
8. Корнеев, М. М. Стальные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов [Текст] / М. М. Корнеев. – К.: Изд-во «Академпрес», 2010. – Т. 1. – 532 с.
  9. Лобанов, Л. М. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой [Текст]: обзор / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Книш, Г. И. Прокопенко // Автомат. сварка. – 2006. – № 9. – С. 3-11.
  10. Кир'ян, В. І. Забезпечення працездатності зварних суцільностінчатих прогонових будов залізничних мостів [Текст] / В. І. Кир'ян, В. В. Книш, Г. О. Линник // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізничного трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 181-189.
  11. Волосевич, П. Ю. Структурные изменения в зоне сварного шва стали Ст3 при ультразвуковой ударной обработке и их влияние на повышение сопротивления усталости [Текст] / П. Ю. Волосевич і ін. // Металлофиз. новейшие техн. – 2008. – Т. 30, № 10. – С. 1429-1443.

Поступила в редколлегию 14.06.2011.

Принята к печати 20.06.2011.